

Концентрация горючих веществ по радиусу топки резко уменьшается, стремясь практически к нулю уже при безразмерной координате равной 0,5. Увеличение концентрации кислорода в дутье с 21 до 42 % практически вдвое уменьшает концентрацию горючих в готовом продукте, что обеспечивает существенное возрастание полноты обжига.

#### Список использованных источников

1. Волкова А. А., Шихов В. Н., Баскаков А. П. Моделирование и организация процессов сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое // Проблемы тепло- и массообмена в процессах горения, используемых в энергетике. Минск : ИТМО им. А. В. Лыкова, 1980. С. 78-96.
2. Тодес О. М., Шейнина Л. С., Файницкий М. З., Пузрин М. А. Двухпараметрическая модель перемешивания твердой фазы в псевдоожиженном слое // Теоретические основы химической технологии. 1980. Т. 14. № 1. С.139-144.

УДК 624.182.9-66

Киселев А. А., Мунц В. А., Павлюк Е. Ю., Мудреченко А. В.  
Уральский федеральный университет  
v.a.munts@urfu.ru

## ОСОБЕННОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ЛИГНИНА В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

**Аннотация.** В работе изложены вопросы сжигания лигнина. Проанализированы возможности утилизации лигнина при его огневом обезвреживании в кипящем слое. В работе рассмотрены результаты экспериментов на котле с кипящим слоем, которые показали высокую (до 80 %) степень связывания оксидов серы непосредственно в процессе сжигания. Использование отходов промышленного производства для выработки тепловой энергии в виде пара или горячей воды позволяет ощутимо экономить топливные ресурсы.

Лигнин - техногенный отход производства гидролизного спирта, представляет собой древесные опилки, обработанные серной кислотой.

Высокая влажность лигнина не позволяет его сжигать в существующих пылеугольных топках. Предварительная подсушка лигнина в выносной топке, за счет сжигания мазута, с последующей подачей в пылеугольный котел, оказалась экономически убыточным мероприятием. Тем более, что, в конечном итоге, этот способ утилизации лигнина привел к сернокислотной коррозии хвостовых поверхностей нагрева.

На котле, установленном в Экспериментально-производственном комбинате УрФУ, было проведено опытное сжигание лигнина с целью определения режимных параметров. При сжигании лигнина котел работал в режиме традиционного кипящего слоя, т. е. воздух в камеру охлаждения не подавался, улавлива-

емый циклоном унос накапливался в камере охлаждения. Топка котла рассчитана на сжигание при скоростях газов 7...9 м/с. Сжигать лигнин при таких скоростях в режиме традиционного кипящего слоя нельзя, поскольку он в основном состоит из частиц размером менее 1 мм, которые будут выноситься из топки, не успев сгореть. Адиабатная температура горения влажного лигнина менее 800 °С, поэтому при его сжигании необходима подача дополнительного высококалорийного топлива. В этом качестве использовался кузнецкий тощий уголь. Расчетная скорость продуктов сгорания в экспериментах была принята равной 3-5 м/с, при меньших скоростях возможна сегрегация золовых частиц каменного угля и шлакование слоя.

Лигнин сжигали в двух режимах, различающихся расходами воздуха.

В первом режиме скорость воздуха на свободное сечение составляла 2 м/с, скорость продуктов сгорания 2,8-3 м/с, доля (по расходу) кузнецкого угля была около 6 %, т. е. при низкой скорости фильтрации газов теплоты сгорания лигнина практически достаточно для поддержания устойчивого горения.

Тепловая мощность, вырабатываемая котлом, рассчитывалась по выражению

$$N = G_w \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $G_w$  - расход воды на котел, т/ч;  $c_w = 1$  ккал/кг - теплоемкость воды;  $t_1$  и  $t_2$  - температура на входе и выходе из котла, °С. Непосредственное измерение расхода лигнина затруднено, поэтому дополнительно его расход определяли по обратному балансу [1].

При этом потерю теплоты с химической неполнотой сгорания определяли по содержанию в уходящих газах оксида углерода, потерю теплоты с механической неполнотой сгорания рассчитывали при измеренном содержании горючих в уносе (на выходе из топки). Потери теплоты от наружного охлаждения для опытно-промышленного котла (в соответствии с тепловым расчетом) принимались равной 1,5 %.

Расхождение рассчитанного расхода лигнина с определенным по числу оборотов шнека не превышало 20 %.

При сжигании мелкодисперсного лигнина часть его сгорает в слое, а часть в надслоевом пространстве, в объеме топки [3, 4]. Доля лигнина, сгорающего в слое, определялась из условий теплового баланса как отношение количества выделившейся в объеме слоя теплоты к располагаемой теплоте топлива:

$$\beta_b = V_{cm} \cdot c_z \cdot t_b / Q_{cm}, \quad (2)$$

где  $Q_{cm}$  и  $V_{cm}$  - теплота, кДж/кг, и объем продуктов сгорания при сжигании смеси топлив с заданным избытком воздуха в топке, м<sup>3</sup>/кг.

В первом режиме расчетная доля лигнина, сгорающего в кипящем слое, составила 90 %, что согласуется с результатами визуального наблюдения. Горение топлива (летучих) и выносимой из слоя мелочи заканчивалось на высоте 3-4 м над уровнем кипящего слоя.

Во втором режиме была увеличена скорость фильтрации газов и одновременно увеличены расходы лигнина и кузнецкого угля. С увеличением скорости

газов уменьшилась до 70 % доля лигнина, сгорающего в слое, поскольку увеличился вынос мелочи из слоя.

Поддержание требуемой для устойчивого горения температуры слоя в диапазоне 800-900 °С может быть обеспечено подогревом воздуха, идущего на ожигание слоя. Расчеты показали, что при скорости газов ~4 м/с температура подогрева воздуха, обеспечивающая устойчивое горение лигнина без дополнительной подачи высококалорийного топлива, должна составлять не менее 200 °С.

Расчетное максимально возможное содержание оксидов серы в продуктах сгорания для условий эксперимента составило 2-2,5 г/м<sup>3</sup>, что существенно превышает предельно допустимые выбросы, установленные для котельного оборудования в пределах 250-400 мг/м<sup>3</sup> [2].

При проведении экспериментов в слой был загружен известняк в количестве 40 кг. Содержание SO<sub>2</sub> в продуктах сгорания после ввода в слой известняка составило 270 мг/м<sup>3</sup>, т. е. степень связывания серы была ~90 %. По мере реагирования и потери активности известняка, степень связывания оксидов серы несколько снизилась и во втором режиме составила ~80 %. Столь хорошие данные по связыванию оксидов серы, по-видимому, связаны с тем, что в лигнине сера содержится уже в виде ионов SO<sub>3</sub>, что облегчает протекание реакций с оксидом кальция.

Расчеты показали, что на 1 тонну сжигаемого лигнина для обеспечения связывания оксидов серы на 80-90 % необходимо подавать 20 кг известняка.

Энергетическая эффективность данного проекта несомненна, т. к. позволяет получать тепловую энергию за счет утилизации не просто отходов промышленного производства, а отходов имеющих высокую токсичность и представляющих сложность при обычном сжигании.

На основе полученных при сжигании лигнина данных было разработано техническое задание на проектирование котельной установки для сжигания лигнина применительно к условиям Тавдинского гидролизного завода.

#### Список использованных источников

1. Мацнев В. В., Штейнер И. Н., Горелик Б. И. Испытание топочного устройства с кипящим слоем // Теплоэнергетика. 1983. № 4. С. 10-13
2. Бородуля В. А., Епанов В. А., Теплицкий Ю. Г. Псевдоожигание дисперсных слоёв крупных частиц // Промышленная теплотехника. 1985. № 1. С. 57-61.
3. Мунц В. А., Лекомцева Ю. Г., Федоренко Ю. Н., Баскаков А. П. Методика расчета процесса выгорания топлив, богатых летучими в псевдоожиганном слое // Сибирский технический журнал. 1991. Вып. 5. С. 55-59.
4. Мунц В. А., Баскаков А. П., Павлюк Е. Ю., Нижникова Е. Ю. Динамика выхода летучих их твердых топлив при их сжигании в кипящем слое // Теоретические основы теплотехники / Под ред. В. П. Семенова, Г. П. Ясникова, Н. И. Платонова. Магнитогorsk: МаГУ, 2000. С. 105-114.